

Monitoreo de la restauración ecológica en un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia): programa y resultados preliminares

Monitoring of ecological restoration in an interandean dry tropical forest (Huila, Colombia): program and preliminary results

JULIÁN ESTEBAN DÍAZ-TRIANA^{1*}, SELENE TORRES-RODRÍGUEZ¹, LESLYE MUÑOZ-P¹, ANDRÉS AVELLA-M.²

¹Fundación Natura Colombia, Carrera 21 No. 39-43. Bogotá, Colombia. jediazt.84and@gmail.com*, selphilodin@gmail.com, lymunozpolanco@gmail.com

²Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Avenida Paseo Bolívar #16-20, Bogotá D.C, Colombia. eaavella@humboldt.org.co

*Autor para correspondencia.

RESUMEN

El monitoreo es un componente clave en el éxito de los proyectos de restauración ecológica y necesario para evaluar la efectividad de las estrategias de restauración y tomar decisiones de manejo adaptativo. El objetivo de este estudio fue evaluar la utilidad de un programa de monitoreo para el seguimiento de seis estrategias de intervención florística implementadas en un área de bosque seco tropical. Se propusieron fases y objetivos de monitoreo en coherencia con las metas y objetivos de restauración del proyecto, así como se determinaron escalas, parámetros e indicadores, frecuencias de seguimiento y protocolos de toma de datos. La supervivencia, el estado fitosanitario y el crecimiento fueron los parámetros priorizados para el seguimiento de las estrategias durante un año y medio, dentro de otros parámetros de efectividad ecológica pertinentes a plazos más extensos. Se presentan los resultados para tres de las seis estrategias. Se obtuvo una supervivencia promedio de 87 % y el aumento paulatino de la frecuencia de individuos sin afectaciones fitosanitarias aparentes, destacándose especies como *Albizia saman*, *Senna spectabilis*, *Maclura tinctoria* y *Celtis iguanaea*. Se observaron tasas de incremento de altura >2,9 cm/mes y DAB >1 mm/mes en las tres estrategias, comparativamente superiores durante el periodo de las lluvias. Los resultados indican que la selección de especies y las acciones de manejo fueron adecuadas para lograr el establecimiento de los arreglos florísticos de las estrategias presentadas. Se propone consolidar el programa de monitoreo a largo plazo en el área.

Palabras clave. Desempeño de siembras, efectividad ecológica, estrategias de restauración, indicadores ecológicos.

ABSTRACT

Monitoring is a key component of ecological restoration projects success, it is required to demonstrate the effectiveness of ecological restoration strategies, and to make adaptive management decisions. This study aimed to evaluate the usefulness of a monitoring program for the assessment and follow-up of six strategies of floristic intervention that were implemented in a tropical dry forest area. Stages and objectives of monitoring were proposed in coherence with restoration goals and objectives of the project; also, scales, parameters, indicators, monitoring frequencies and data collection protocols were determined. Survival, phytosanitary state, and growth were prioritized parameters for monitoring strategies for one and a half year, among other parameters of ecological effectiveness relevant to longer terms. We obtained a mean survival of 87 % and gradual increasing of individual frequency

Citación: Díaz-Triana JE, Torres-Rodríguez S, Muñoz-P L, Avella-M. A. 2019. Monitoreo de la restauración ecológica en un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia): programa y resultados preliminares. *Caldasia* 41(1):60–77. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71318.

Recibido: 02/abr/2018 **Aceptado:** 01/nov/2018

without apparent phytosanitary affectations, with some remarkable species: *Albizia saman*, *Senna spectabilis*, *Maclura tinctoria* and *Celtis iguanaea*. We present results from three of the six strategies. We observed height (>2.9 cm/month) and diameter at tree base (>1 mm/month) increasing increments on the three strategies, comparatively superiors during the rainy period. Results show that species selection and management actions were appropriate for achieving the establishment of floristic arrangements for the presented strategies. We propose to consolidate the monitoring program for long term in the area.

Key words. Ecological effectiveness, ecological indicators, ecological restoration strategies, plant performance.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo se define como la colección y análisis de observaciones repetidas para evaluar cambios en la condición y progreso hacia el logro de un objetivo de manejo (Elzinga *et al.* 1998), y típicamente se hace para evaluar el cambio o las tendencias en uno o más recursos (Block *et al.* 2001). En el contexto de la Restauración Ecológica (RE) el monitoreo puede definirse como el proceso de seguimiento constante y repetido en el tiempo y el espacio de los cambios que ocurren en la sucesión ecológica de un ecosistema asistido, mediante la medición de variables específicas con una periodicidad y plazo definidos (Vargas 2011, Brancalion *et al.* 2012, Ramírez *et al.* 2015). El monitoreo es clave para el éxito de los proyectos de RE (Viani *et al.* 2018) y particularmente de las estrategias de restauración (ER), revela fallas y permite emprender acciones encaminadas a establecer correcciones oportunas que conduzcan al logro de los objetivos de restauración planteados (O'Connor *et al.* 2004, Vallauri *et al.* 2004).

El monitoreo es esencial para saber si los proyectos logran mejorar las condiciones ecológicas de los sitios o paisajes intervenidos (DeLuca *et al.* 2010). Mediante el monitoreo también se comprenden algunos de los procesos implicados en la recuperación de los ecosistemas y la regeneración natural, y se aporta información crítica para el avance de la ecología de la restauración (Klein *et al.* 2007). Un estudio de monitoreo puede

requerir varios años e incluso décadas para demostrar que el ecosistema asistido ha recuperado la trayectoria sucesional deseada (Holl y Cairns 2002, Díaz-Martín 2007). A su vez, el monitoreo debe incluirse en todo proyecto de restauración para evitar correr el riesgo de invertir mal los recursos o jamás conocer los resultados de las acciones emprendidas para restaurar un ecosistema (Rieger *et al.* 2014). En la formulación de un programa de monitoreo es importante definir no solamente los parámetros a monitorear y los indicadores adecuados sino también las escalas espaciales y temporales en las que se efectuará el seguimiento a la restauración; se debe considerar su coherencia con respecto a los objetivos de restauración del proyecto ya que de éstos se definen los objetivos del programa (Díaz-Martín 2007).

El monitoreo debe concebirse desde la planeación de un proyecto y refinarse en su curso (Holl y Cairns 2002, Méndez-Toribio *et al.* 2017), cumpliendo etapas entre el corto y largo plazo (Herrick *et al.* 2006), enfocadas en la evaluación de la implementación, la efectividad ecológica y la validación de ER (Block *et al.* 2001, Díaz-Martín 2007). Dichas etapas se clasifican en tipos de monitoreo dirigidos a demostrar el alcance de metas particulares del proceso de restauración a través de preguntas orientadoras (Hutto y Bellote 2013). El monitoreo de implementación evalúa el desarrollo de las acciones de restauración como se prescribieron, el monitoreo de efectividad evalúa el cumplimiento de los

objetivos de restauración, y el monitoreo de validación analiza las relaciones de causa-efecto entre las acciones y su impacto.

Este manuscrito evalúa la utilidad de un programa de monitoreo con base en la experiencia desarrollada en el marco de un proyecto piloto de restauración para un área de bosque seco tropical (bs-T) interandino del Alto Magdalena en Colombia. Se presentan la formulación del programa de monitoreo con fases, objetivos, parámetros e indicadores y frecuencias de seguimiento; y resultados preliminares de su ejecución entre los años 2016 y 2017 para tres de las seis ER implementadas en el proyecto piloto. Los resultados iniciales de efectividad ecológica comprenden el seguimiento del desempeño de los arreglos florísticos de las ER medido a través de parámetros priorizados como la supervivencia, el estado fitosanitario y el crecimiento en altura y diámetro a la altura de la base (DAB).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área se ubica en el departamento del Huila en la vereda El Pedernal del municipio de El Agrado (2°18'15" Norte, 75°41'27" Oeste), dentro del área de compensación ambiental y restauración ecológica de la Central Hidroeléctrica El Quimbo, la cual hace parte de la zona norte de la Serranía de las Minas, situada en el valle alto del río Magdalena (Material suplementario – Anexo 1). La zona tiene una precipitación promedio anual de 1200 mm y una temperatura media anual de 25 °C, la altitud varía entre 720 y 1400 m (Fundación Natura c2010). El régimen de lluvias es bimodal, con una temporada seca marcada entre junio y agosto y una temporada de lluvias en los meses de marzo-abril (INGETEC c2008, Pinzón datos no publ.). El ecosistema y la cobertura vegetal original del área eran de bs-T, pero actualmente

el paisaje es heterogéneo y dominan los pastizales abiertos y arbolados, seguidos por arbustales y bosques (algunos secundarios y relictos) localizados en riberas y pequeños valles escarpados, como producto de la transformación para la actividad agrícola y pecuaria desde hace más de 70 años. Para el área [Torres-Rodríguez et al. \(2019\)](#) reconocen al menos cinco escenarios de restauración de los cuales el de mayor estado de degradación son las zonas con dominio de gramíneas exóticas invasoras (Material suplementario – Anexo 2).

Estrategias de restauración

Como parte de la ejecución de un proyecto piloto de restauración de la zona para cuatro años, cuya meta fue evaluar y determinar las ER más efectivas para iniciar la Restauración Ecológica en 140 ha priorizadas, se implementaron seis estrategias de intervención florística a saber: i) nucleación en pastizales abiertos ii) siembras bajo nodrizas aisladas en pastizales arbolados, iii) siembra bajo nodrizas agrupadas en transición pastizal-arbustal, iv) ampliación de borde de bosque y arbustal, v) enriquecimiento en arbustales y bosques, y vi) restauración espontánea ([Torres-Rodríguez et al. 2019](#)) (Tabla 1). La implementación se realizó de manera escalonada entre agosto de 2015 y junio de 2016 con un evento de resiembra dentro del primer trimestre, por lo que las ER no fueron implementadas de manera simultánea.

Formulación del programa de monitoreo

La formulación del programa se realizó mediante cuatro talleres de trabajo entre asesores, profesionales, administradores y técnicos de campo, para definir concertadamente sus fases y componentes en torno a seis elementos principales de discusión y proyectar su implementación inicial (Fig. 1). Se siguió el modelo

Tabla 1. Estrategias de restauración ecológica (Adaptado de [Torres-Rodríguez *et al.* 2019](#)).

Estrategia	Acciones
<i>Nucleación en pastizales abiertos</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Implementación de parcelas cuadradas de 32 x 32 m con núcleos de ensambles florísticos de las siguientes características: *Combinación de especies pioneras, intermedias y avanzadas. * Tratamiento de densidad alta con remoción de gramíneas invasoras y siembra en cuatro arreglos florísticos de 196 individuos de 30 especies. *Tratamiento de densidad intermedia con descompactación del suelo con tractor, siembra de 2 arreglos florísticos, 98 individuos y quince especies. *Tratamiento de densidad intermedia sin descompactación del suelo con siembra de dos arreglos florísticos, 98 individuos y quince especies. -Corte de gramíneas antes de la siembra salvo en el tratamiento con remoción de suelo
<i>Siembra bajo árboles nodriza aislados en pastizales arbolados</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Implementación de 30 parcelas circulares con las siguientes características: *37 individuos de seis especies en dos círculos bajo el dosel de arbolitos de <i>Guazuma ulmifolia</i> aislados en la matriz de pastos. *El primer círculo de siembra a 2,5 m del fuste con ocho individuos de tres especies esciófitas y el segundo círculo a 7 m con 29 individuos de cuatro especies de heliófitas durables. *Especies del círculo interno: <i>Hymenaea courbaril</i> y <i>Tabebuia rosea</i>. Especies del círculo externo: <i>Casearia corymbosa</i>, <i>Enterolobium cyclocarpum</i>, <i>Pseudosamanea guachapele</i> y <i>Senna spectabilis</i>. -Corte de gramíneas antes de la siembra en toda la parcela circular.
<i>Siembras bajo agrupaciones de árboles nodriza en transición de pastizales a arbustales</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Implementación de 32 parcelas circulares con las siguientes características: *Dos arreglos florísticos de siembra (especies alternadas y sectorizadas) *71 individuos de once especies en tres círculos de siembra *Primer círculo a 2,5 m del fuste del árbol central con 8 individuos de dos especies esciófitas de estados sucesionales avanzados. *Segundo círculo a 5 m con 21 individuos de tres especies esciófitas. *Tercer círculo a 10 m con 42 individuos de seis especies heliófitas. *Especies - círculo interno: <i>Cedrela odorata</i>, <i>C. corymbosa</i>, <i>H. courbaril</i> y <i>P. guachapele</i> - círculo intermedio: <i>Ceiba pentandra</i>, <i>Celtis iguanaea</i>, <i>E. cyclocarpum</i>, <i>Guapira pubescens</i>, <i>Guarea guidonia</i> y <i>Maclura tinctoria</i>- círculo externo: <i>P. guachapele</i>, <i>C. pentandra</i>, <i>C. iguanaea</i>, <i>E. cyclocarpum</i>, <i>G. pubescens</i>, <i>Jacaranda caucana</i>, <i>Randia armata</i>, <i>Sapindus saponaria</i>, <i>S. spectabilis</i>, <i>Spondias mombin</i>, -Corte de gramíneas antes de la siembra en toda la parcela circular.
<i>Ampliación de borde</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Implementación de siembras en franjas de 10 x 5 m en el borde de transición entre bosques y arbustales, y pastizales. -Manejo de retoños sobre <i>Croton glabellus</i> y <i>C. corymbosa</i>, corte de lianas y ramas secas. -Siembra de 17 individuos de cinco especies incluyendo esciófitas para proveer hábitat en las áreas con mayor sombra y alimento para la fauna. -Corte de gramíneas antes de la siembra en la parcela rectangular.
<i>Enriquecimiento en arbustales y bosques</i>	<ul style="list-style-type: none"> -Manejo silvicultural para mejorar desarrollo de individuos establecidos y generar espacios adecuados para la siembra. -Manejo de renuevos en especies dominantes como <i>C. corymbosa</i> y <i>C. glabellus</i> para focalizar la inversión de sus recursos en altura y no en más rebrotes. -Implementación de 196 módulos de enriquecimiento incluyendo: *Siembra de 15 especies para favorecer el desarrollo de los estratos arbolito y arbóreo, atraer fauna y algunas amenazadas en módulos hexagonales de 6 m² con siete individuos de la misma especie. *Especies sembradas: <i>Albizia saman</i>, <i>Amyris pinata</i>, <i>Anacardium excelsum</i>, <i>Astronium graveolens</i>, <i>Attalea butyracea</i>, <i>C. odorata</i>, <i>C. pentandra</i>, <i>Cinnamomum triplinerve</i>, <i>G. guidonia</i>, <i>H. courbaril</i>, <i>Pseudobombax septenatum</i>, <i>T. rosea</i>, <i>Trichantera gigantea</i>, <i>Triplaris cummingiana</i> y <i>Zygia longifolia</i>.
<i>Restauración espontánea</i>	<p>Para todas las estrategias de restauración activa se realizó el aislamiento de tensionantes con el encerramiento del área para evitar el pastoreo y el corte de leña. También se realizaron labores de mantenimiento como el riego, la fertilización, el control de herbívoros, la liberación de enredaderas y el corte de pasto esporádico en las unidades de implementación. Las siembras se realizaron con individuos de alturas entre 40 y 50 cms. En todos los casos se realizó un evento de resiembra para sustituir los individuos muertos dentro del primer trimestre luego de la siembra.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Aislamiento de tensionantes. -Delimitación de parcelas de control a tratamientos de restauración activa.

Se resaltan en negrita las estrategias para las cuales se provee mayor información específica y relativa al monitoreo por ser aquellas seleccionadas para la muestra de resultados preliminares de efectividad ecológica en este manuscrito. El Anexo 2 del material suplementario brinda especificaciones sobre los escenarios de restauración intervenidos con estas estrategias y sus condiciones iniciales.

establecido por [Herrick et al. \(2006, 2015\)](#) para el desarrollo y diseño de un programa de monitoreo, y se tomó en cuenta el estándar principios, criterios e indicadores (PCyI) descrito por [Morán et al. \(2006\)](#) para la jerarquización coherente de metas, objetivos e indicadores, los cuales se definieron con base en la metodología SMART ([Bjerke y Renger 2017](#)). Se definieron parámetros de seguimiento a la efectividad ecológica que se clasificaron según la fase de monitoreo, las escalas y la asociación a tipos de indicadores ([SDC c2003, DGADRE c2015](#)). Los indicadores se seleccionaron con base

en las recomendaciones de [Díaz-Martín \(2007\)](#) y [Holl y Cairns \(2002\)](#) y según su prioridad en el corto plazo, dentro del cual se determinaron las frecuencias de seguimiento.

Implementación inicial del programa de monitoreo

Para este trabajo se seleccionaron los datos de seguimiento a las tres ER implementadas con mayor antigüedad: i) siembras bajo nodrizas aisladas en pastizales arbolados, ii) siembra bajo agrupaciones de nodrizas en transición

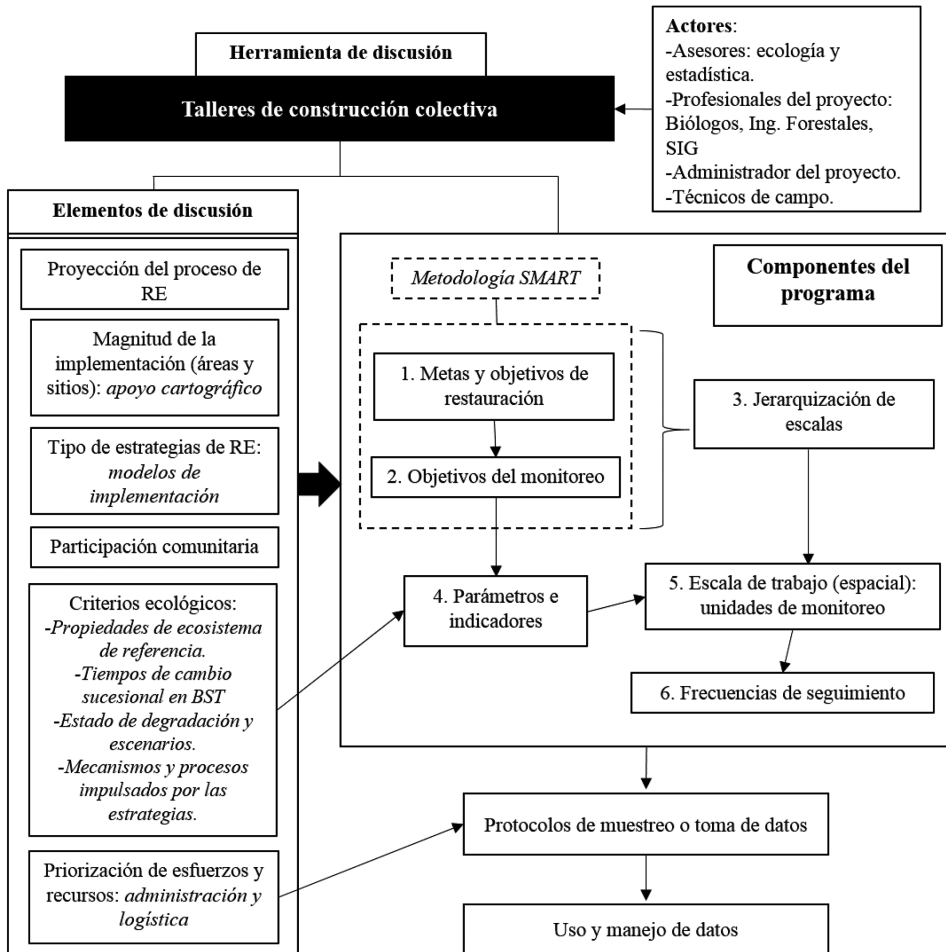


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de formulación del programa de monitoreo de estrategias de Restauración Ecológica del proyecto piloto ejecutado en el área de estudio.

pastizal-arbustal y iii) enriquecimiento en bosques (Tabla 1 y Material suplementario – Anexo 3). El monitoreo consistió en el seguimiento del desempeño de los arreglos florísticos de las ER usando indicadores seleccionados y derivados de tres parámetros: i) supervivencia, ii) estado fitosanitario y iii) crecimiento (Holl y Cairns 2002); los cuales fueron: tasa de supervivencia (%), frecuencias relativas de categorías de estado fitosanitario (%), e incrementos de altura y DAB (González-M *et al.* 2015). Los datos fueron tomados por un equipo de auxiliares locales capacitado mediante talleres teórico-prácticos bajo el liderazgo y supervisión de un equipo de profesionales, con la intención de dejar capital humano capacitado en la región. Se estandarizaron los métodos y criterios de observación-medición y se aplicaron protocolos técnicos de toma de datos con criterios de garantía de calidad (Herrick *et al.* 2015). Las mediciones de supervivencia y estado fitosanitario se registraron por observación directa y cualitativa (Torres y Magaña 2011), y las de crecimiento con el uso de una regla plegable de fibra de vidrio de 2 m para altura y un calibrador manual metálico (precisión 1/50 mm) para DAB (González-M *et al.* 2015). El estado fitosanitario se evaluó como la incidencia de cinco categorías basadas en porcentajes de afectación de las plántulas por factores bióticos y abióticos como el estrés hídrico y la herbivoría, y evidenciados en la apariencia de cada individuo. La altura se tomó como la distancia desde el suelo al punto de proyección más alto de la copa y el DAB a una altura de 5 cm sobre la superficie del suelo.

Para las dos primeras ER se realizaron censos en 30 y 32 parcelas respectivamente y para la tercera un muestreo con selección aleatoria de 131 módulos (máximo diez por especie). Las réplicas fueron las parcelas y módulos, y las unidades de observación fueron los individuos sembrados. Se obtuvieron datos

de quince meses de seguimiento entre abril de 2016 y julio de 2017, luego de un trimestre posterior a la implementación de resiembras, y con frecuencias trimestrales o semestrales según cada indicador.

Manejo y procesamiento de datos

Los datos se revisaron y depuraron de acuerdo con criterios de control de calidad (Herrick *et al.* 2015). Se calcularon el porcentaje de supervivencia, los incrementos de altura y DAB, y las tasas de crecimiento neto de altura y DAB, los cuales se reportan como los promedios acompañados de la desviación estándar (SD) como medida de varianza. Las tasas se calcularon como los incrementos de cada variable divididos en doce meses, tiempo comprendido para los mismos. Los resultados se compararon entre nodrizas aisladas y nodrizas agrupadas mediante la prueba de t-Student (n=30) para la diferencia entre dos medias, realizada con el Software PAST 3.19 (Hammer *et al.* 2001). No se realizaron comparaciones con el enriquecimiento en bosque por ser una estrategia implementada en un escenario con vegetación de mayor desarrollo en atributos florísticos y estructurales, y para la que se esperaban resultados de desempeño inferiores en el corto plazo. Respecto al estado fitosanitario se calcularon las frecuencias relativas de las categorías de afectación tomando la totalidad de individuos sumada por el total de las réplicas.

RESULTADOS

Programa de monitoreo ecológico

Se definieron tres etapas para el monitoreo: implementación, efectividad y validación. Las etapas del monitoreo del proceso de RE se dividieron en siete fases comprendidas entre el corto y largo plazo (Tabla 2). El monitoreo de implementación y el monitoreo de efectividad fueron identificados como

Tabla 2. Etapas de monitoreo y fases propuestas para el proceso de restauración ecológica del bosque seco tropical (bs-T) del área de estudio.

ETAPAS DE MONITOREO Y/O EVALUACIÓN	FASE	RELEVANCIA	PLAZO	INTERVALO DE TIEMPO MÍNIMO
Implementación (I)	I - 1	Ajuste de unidades de implementación y arreglos florísticos de restauración en terreno (orientación, especies, cantidad, densidad, secuencia).	Corto	*Primer año
	I - 2	Veeduría de mantenimiento de implementaciones (acciones complementarias y reiteradas del paquete tecnológico).	Corto	*Segundo a tercer año
	I - 3	Control de acciones operativas de manejo adaptativo.	Corto a mediano	*Tercer a décimo año
Efectividad (E)	E - 1	Demostración del éxito del establecimiento de tratamientos de restauración (resultados).	Corto	**Primer a tercer año
	E - 2	Demostración de efectos locales (impactos) de los tratamientos en la sucesión ecológica y trayectorias sucesionales.	Corto	**Tercer a quinto año
	E - 3	Demostración de efectos periféricos de los tratamientos (otras escalas superiores a la local).	Mediano-Largo	**Quinto a décimo año
Validación (V)	V - continua	Demostración directa (causa-efecto) del éxito conferido por la implementación de los tratamientos y acciones de restauración. Evaluación de recuperación de atributos de un ecosistema completamente restaurado. Monitoreo adaptativo articulado a procesos de investigación científica.	Largo (puede iniciar en el corto)	Permanente

*Tiempo contado luego de iniciadas labores de implementación. **Tiempo contado luego de finalizadas labores de implementación.

viables y relevantes para el corto plazo y la duración del proyecto piloto. Se propuso el desarrollo del monitoreo de implementación con énfasis operativa para la verificación y ajustes de la implementación de ER, el seguimiento de labores de mantenimiento y acciones complementarias a la intervención florística, y el reporte del cumplimiento de acciones eventuales de manejo adaptativo. El monitoreo de efectividad se propuso como una etapa sistemática y detallada de relevancia técnica-científica, cuyo objetivo para la primera fase fue demostrar el establecimiento exitoso de los arreglos florísticos y las ER, teniendo como criterio de éxito la obtención de supervivencias superiores al 60 % (Torres y Magaña 2001)

e incrementos de altura y DAB reflejados en tasas de crecimiento positivas; pero que en otras fases se aplica para demostrar el cumplimiento de otros objetivos de mediano y largo plazo dentro del proceso de RE involucrando escalas superiores de trabajo. El monitoreo de validación se contempló como una etapa transversal para la demostración científica de los impactos de las ER a partir de la articulación de procesos de investigación a largo plazo (Lindenmayer y Linkens 2009), que aborden el estudio de efectos ecológicos en el ecosistema y el área, trazables y atribuibles a las intervenciones florísticas y el manejo adaptativo de la RE y el monitoreo.

Se definieron tres metas de restauración precisas, derivadas de la meta general del proyecto piloto, y ocho objetivos específicamente para el corto plazo en relación con dichas metas (Material suplementario – Anexo 4). Para el seguimiento de la efectividad ecológica del conjunto de ER propuestas se establecieron tres objetivos de monitoreo y nueve objetivos de evaluación (Tabla 3) aplicables al corto y mediano plazo. Se propusieron diez parámetros ecológicos multiescala para la demostración de resultados de desempeño de las siembras y de su impacto en la sucesión ecológica (Tabla 4), de los que se determinaron seis indicadores principalmente útiles para el

corto plazo y de frecuencias de seguimiento variables (Tabla 5).

Monitoreo de implementación – fase inicial

Se definieron unidades comunes de implementación y monitoreo de las ER (Torres-Rodríguez *et al.* 2019) (Material suplementario – Anexo 5) para prever y preparar la logística, requerimientos y procedimientos de los eventos de toma de datos del monitoreo de efectividad. En la implementación de ER se estandarizaron las unidades corrigiendo su orientación cardinal, dimensión, distribución y distancias de separación en el terreno, y la

Tabla 3. Síntesis de objetivos de monitoreo y evaluación de la efectividad de estrategias de restauración ecológica del bosque seco tropical (bs-T) en el área de estudio.

ESTRATEGIA DE RESTAURACIÓN	OBJETIVOS DE MONITOREO O EVALUACIÓN (Códigos)	CODIFICACIÓN DE OBJETIVOS
Nucleación en pastizales abiertos	M1, M2, M3, E1, E2, E3, E4, E5, E6.	<u>Monitoreo de efectividad ecológica</u> M1. Evaluar periódicamente la supervivencia y el estado fitosanitario del conjunto de individuos de los ensamblajes florísticos y espaciales establecidos en las parcelas de implementación de estrategias. M2. Evaluar periódicamente el crecimiento del conjunto de individuos de los ensamblajes florísticos establecidos en las parcelas de implementación de estrategias. M3. Evaluar periódicamente el reclutamiento de plántulas de las fases sucesionales arbustivas y arbóreas en las parcelas de las estrategias.
Siembras bajo árboles nodriza (aislados y agrupaciones)	M1, M2, M3, E1, E2, E3, E4, E5, E6.	
Enriquecimiento en bosques y arbustales	M1, M2, M3.	<u>Evaluación de efectividad ecológica</u> E1. Evaluar el cambio en el microclima. E2. Evaluar el cambio en la densidad aparente del suelo. E3. Evaluar el cambio en la incidencia de la luz bajo dosel y/o sobre el suelo. E4. Evaluar el cambio en el contenido de materia orgánica del suelo. E5. Evaluar el cambio en la composición y abundancia de la comunidad de artrópodos. E6. Evaluar el cambio en la cobertura de pastos exóticos. E7. Evaluar la avifauna dispersora de frutos y semillas asociada a las coberturas vegetales. E8. Evaluar la composición y riqueza de la lluvia de semillas en las diferentes coberturas vegetales. E9. Evaluar la composición y riqueza del banco de semillas en las diferentes coberturas vegetales.
Ampliación de borde	M1, M2, M3, E1, E2, E6.	
Restauración espontánea	M1, M2, M3, E1, E2, E3, E4, E5, E6.	
Todas las estrategias - paisaje	E7, E8, E9.	

M = Monitoreo, E = Evaluación.

Tabla 4. Parámetros ecológicos propuestos para el monitoreo o evaluación de la efectividad de estrategias de restauración implementadas en el área de estudio: correspondencia con la escala ecológica (nivel de organización), temporalidad, fase de monitoreo y tipos de indicadores.

PARÁMETROS	NIVEL DE ORGANIZACIÓN	MARCO TEMPORAL	FASE DE MONITOREO	TIPO DE INDICADORES ASOCIADOS
-Supervivencia. -Estado fitosanitario. -Crecimiento.	Individuo- Especie-Población	Corto plazo (5 años)	Efectividad 1	Resultados
-Reclutamiento o colonización. -Microclima (parcelas). -Físico-química del suelo. -Estructura de la vegetación.	Población- Comunidad- Ecosistema	Corto-Mediano plazo (5-10 años)	Efectividad 1 y 2	Impacto
-Reclutamiento o colonización. -Reproducción vegetal. -Producción de biomasa vegetal. -Estructura de la vegetación. -Cobertura vegetal. -Microclima (local).	Población- Comunidad- Ecosistema-Paisaje	Mediano-Largo plazo (más de 10 años)	Efectividad 3 y Validación	Impacto/ Sostenibilidad

ubicación de arreglos florísticos e individuos acorde con las secuencias de siembra de especies establecidas, para los casos necesarios. Además, se coordinó el evento de resiembras y se brindaron las pautas para sincronizar las acciones de mantenimiento de acuerdo con la observación de la adaptación inicial de los individuos a las condiciones de sitio.

Desempeño de arreglos florísticos de ER seleccionadas

Supervivencia

La supervivencia promedio de las plantas en las tres ER fue superior al 80 % en el último evento de monitoreo, mayor para nodrizas agrupadas (91 ± 5 %) y menor para enriquecimiento en bosque ($81 \pm 30,4$ %) (Fig. 2a). Hubo diferencia significativa entre la supervivencia observada en nodrizas agrupadas y nodrizas aisladas ($t_{58} = -2,38$, $P < 0,05$). Entre marzo y diciembre de 2016 se experimentaron los mayores cambios de la supervivencia entre eventos, mientras en el último semestre los valores se estabilizaron.

Las especies que más aportaron a la supervivencia fueron *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby (97 %) y *Pseudosamanea guachapele* (Kunth) Harms (95 %) en nodrizas aisladas, *Celtis iguanaea* (Jacq.) Sarg. y *Maclura tinctoria* (L.) D. Don ex Steud. en nodrizas agrupadas (99 %) y *Albizia saman* (Jacq.) F. Muell., *Attalea butyracea* (Mutis ex L. f.) Wess. Boer, *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., *Hymenaea courbaril* L., *Pseudobombax septenatum* (Jacq.) Dugand y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en enriquecimiento en bosque (100 %). Las especies con mayor mortalidad fueron *T. rosea* (35 %) en nodrizas aisladas (Fig. 3a), *Cedrela odorata* L. (28 %), *Randia armata* (Sw.) DC. (25 %) (Fig. 3b), *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (39 %) y *Guarea guidonia* (L.) Sleumer (33 %) en nodrizas agrupadas (Fig. 3c) y *Anacardium excelsum* (Bertero & Balb. ex Kunth) Skeels (94 %), *Trichanthera gigantea* (Bonpl.) Nees (65 %) y *Cinnamomum triplinerve* (Ruiz & Pav.) Kosterm. (63 %) en enriquecimiento en bosque (Fig. 3d). La causa principal de mortalidad fue la desecación como producto de las limitantes hídricas propias del bs-T.

Tabla 5. Indicadores generales de resultados o impacto para el monitoreo de efectividad ecológica de estrategias de restauración en el corto plazo.

PARÁMETRO	INDICADOR	FRECUENCIA	JUSTIFICACIÓN
Supervivencia	-Porcentaje (%) de supervivencia de especies e individuos sembrados.	-Trimestral hasta los dos años y en adelante semestral.	Permite construir curvas de supervivencia en el tiempo y refleja la adaptación y susceptibilidad de las especies a las condiciones del hábitat y el manejo dado en el tratamiento de restauración.
Estado fitosanitario	-Porcentaje de individuos asociados a cinco categorías de afectación-adaptación. Nivel 0: Afectación 0 %. Nivel 1: Afectación < 25 % Nivel 2: Afectación entre 25 y 50 % Nivel 3: Afectación entre 50 y 75 % Nivel 4: Afectación > 75 %	-Trimestral hasta los dos años y en adelante semestral.	Permite detectar y explicar afectaciones al desempeño.
Crecimiento	-Incremento en altura de especies e individuos sembrados o tasa de crecimiento. -Incremento en DAB de especies e individuos sembrados o tasa] de crecimiento.	-Semestral los primeros dos años y en adelante anual. -Semestral los primeros dos años y en adelante anual o bianual según estrategia.	Permite evaluar directamente el establecimiento y la posible persistencia de las plantas sembradas. Permite verificar el desarrollo adecuado de los individuos cuando se analiza junto con la altura.
Reclutamiento	-Riqueza de nuevas especies o grupos ecológicos de plantas reclutados (No. especies sucesionales intermedias o tardías nuevas) -Abundancia de nuevos individuos reclutados (No. de individuos de especies nuevas reclutadas)	-Semestral después del primer año de cumplida la implementación y con transición a anual. -Semestral después del primer año de cumplida la implementación y con transición a anual.	Indica la ocurrencia de procesos previos de dispersión, implantación y el establecimiento de otras especies procedentes de fuentes de propágulos cercanas. Es un indicador de sucesión. Es un indicador de sucesión relacionado con los cambios alternantes debidos a la implantación y el establecimiento. En las comunidades de plantas es habitual encontrar estados de dominancia y reemplazos de individuos por lo que este atributo puede fluctuar.

Estado fitosanitario

Se encontró que las frecuencias de las plantas registradas en las categorías de estados fitosanitarios 0 y 1 predominaron durante el seguimiento mostrando una condición óptima de los individuos. Para julio de 2017 la categoría 1 tuvo mayor proporción de individuos registrados en nodrizas aisladas y nodrizas agrupadas mientras que la categoría 0 tuvo mayor proporción en enriquecimiento en bosque. La frecuencia de las categorías 3 y 4 se incrementó

principalmente para el segundo trimestre, pero disminuyó sustancialmente en el año posterior, mostrando la recuperación de individuos sobrevivientes (Tabla 6).

Crecimiento

Se registraron incrementos de altura y DAB de las plantas en todas las ER (Fig. 2b) los cuales fueron mayores entre el segundo y tercer evento de monitoreo, periodo correspondiente a la temporada de lluvias. Los valores promedio de ambas variables

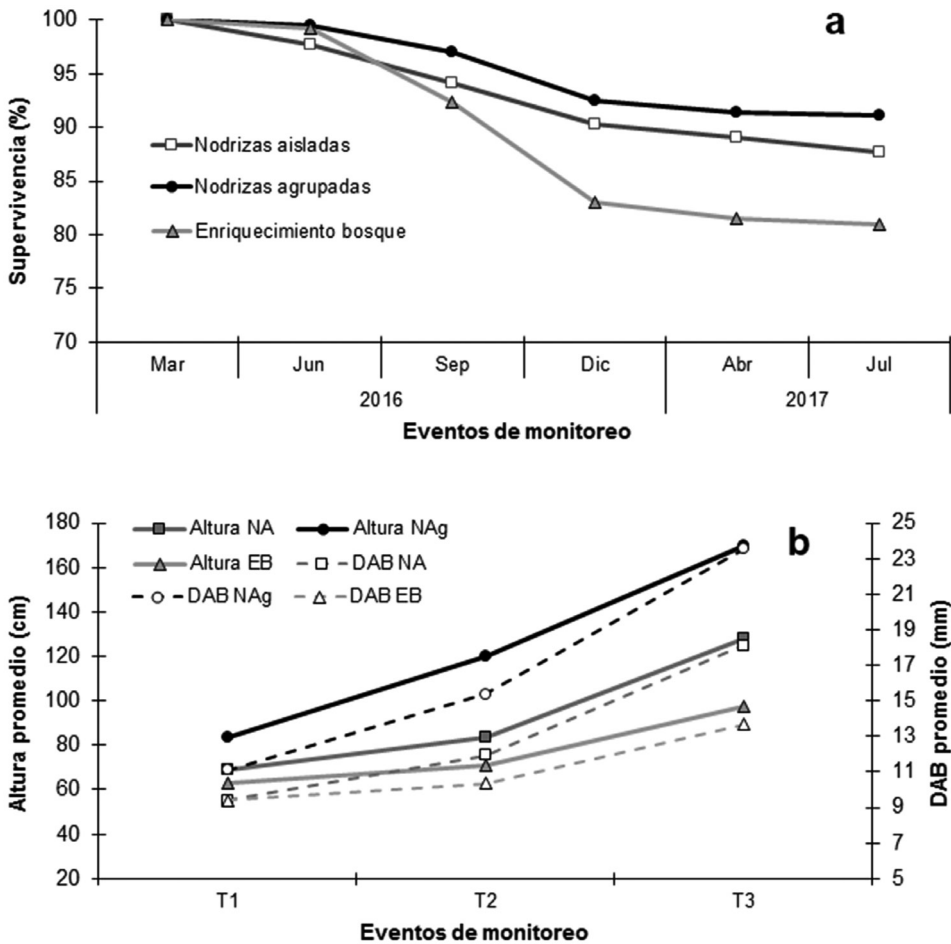


Figura 2. Desempeño de arreglos florísticos de tres estrategias de restauración del bosque seco tropical (bs-T). **a.** Supervivencia promedio a lo largo de cinco periodos trimestrales y **b.** Altura promedio y DAB promedio en quince meses de seguimiento (T = periodos de monitoreo semestrales no simultáneos comprendidos entre marzo de 2016 y julio de 2017, NA = nodrizas aisladas, NAg = Nodrizas agrupadas, EB = Enriquecimiento en bosque).

fueron superiores en nodrizas agrupadas en todos los eventos de monitoreo y menores en enriquecimiento en bosque en los dos últimos eventos; las plantas en nodrizas agrupadas alcanzaron una altura promedio de 1,7 ($\pm 0,24$) m y un DAB promedio de 2,4 ($\pm 0,4$) cm. Se hallaron diferencias significativas entre las alturas finales de nodrizas agrupadas y nodrizas aisladas ($t_{60} = -8,32, P < 0,001$) y entre los DAB finales de estas dos estrategias

($t_{60} = -5,77, P < 0,001$). Los promedios de las tasas de crecimiento en altura fueron de 7,2 ($\pm 1,5$), 4,9 (± 1) y 2,8 ($\pm 2,6$) cm/mes para nodrizas agrupadas, nodrizas aisladas y enriquecimiento en bosque respectivamente (Material suplementario – Anexo 6). En este mismo orden, los promedios de las tasas de crecimiento en DAB fueron de 1 ($\pm 0,3$), 0,7 ($\pm 0,2$) y 0,4 ($\pm 0,4$) mm/mes. Hubo diferencias significativas entre las tasas de

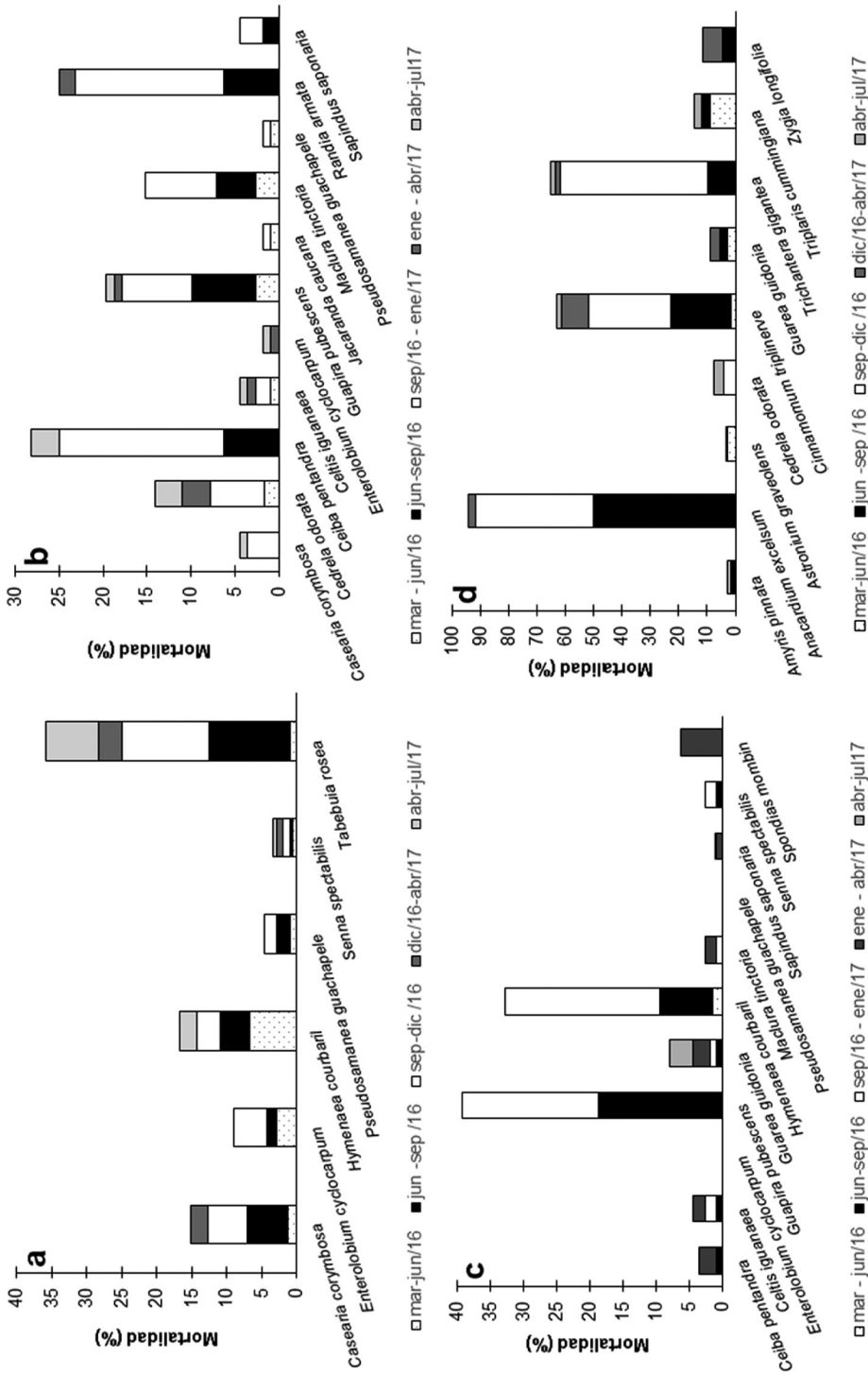


Figura 3. Mortalidad acumulada (%) de especies de restauración de bosque seco tropical (bs-T) en quince meses de seguimiento **a.** Nodrizas aisladas; **b.** Nodrizas agrupadas (siembra intercalada); **c.** Nodrizas agrupadas (siembra sectorizada); **d.** Enriquecimiento en bosque.

Tabla 6. Frecuencias relativas (%) de categorías de estado fitosanitario registradas sobre plantas vivas de tres estrategias de restauración durante cinco periodos trimestrales.

Estrategia	Categoría	2016			2017	
		Jun	Sep	Ene	Abr	Jul
Nodrizas aisladas (pastos)	0	10,2	6,3	30,8	38,1	34,3
	1	65,3	37,5	52,9	46,3	50,3
	2	19,0	15,5	8,4	11,2	9,8
	3	4,3	13,2	5,7	2,3	2,8
	4	1,2	27,5	2,2	2,0	2,9
Nodrizas agrupadas (transición a arbus-tales)	0	25,7	4,6	25,2	38,1	41,7
	1	54,6	43,0	64,1	52,4	44,2
	2	9,8	14,9	5,7	6,3	7,8
	3	6,6	18,1	2,7	2,1	2,6
	4	3,3	19,4	2,2	1,1	3,8
Enriquecimiento bosque (ribera)	0	30,5	10,6	11,7	59,2	52,2
	1	62,7	73,4	61,5	31,0	33,3
	2	4,4	5,8	11,9	6,6	9,8
	3	0,8	3,4	8,8	2,1	3,3
	4	1,5	6,7	6,2	1,1	1,4

Categorías de estado fitosanitario: 0 = sin afectación aparente, 1= afectación < 25 %, 2 = afectación 25 ≤ 50 %, 3 = afectación 50 ≤ 75 %, 4 = afectación ≥ 75 %.

crecimiento en altura de nodrizas agrupadas y nodrizas aisladas ($t_{60} = -7,34$, $P < 0,001$) y entre las tasas crecimiento en DAB de las dos estrategias mencionadas ($t_{60} = -5,04$, $P < 0,001$).

DISCUSIÓN

La experiencia del presente estudio mostró la importancia de dos aspectos para formular un programa de monitoreo: i) mantener la coherencia y pertinencia de metas y objetivos de restauración explícitos ([Vargas y Mora 2007](#)) con los objetivos de monitoreo y la definición de parámetros o indicadores, además de la escala a la cual son aplicables ([Bash y Ryan 2002](#), [Marignani et al. 2007](#), [Londe et al. 2017](#), [Park y Higgs 2018](#)) y la frecuencia del seguimiento para obtener datos significativos ([England et al. 2008](#), [Matthews et al. 2009](#)) y ii) la selección y

priorización de variables para el monitoreo ([Ehrenfeld 2000](#), [Van Diggelen et al. 2001](#), [Apfelbaum y Haney 2012](#)). De esta forma, la implementación inicial del programa de monitoreo permitió probar su utilidad en el corto plazo para demostrar el cumplimiento de un objetivo como el establecimiento de estrategias de restauración para el Bosque Seco Tropical (bs-T) con la aplicación de métodos de campo, colecta y análisis de datos. [Rieger et al. \(2014\)](#) sostienen que los estudios piloto de monitoreo son necesarios para verificar la capacidad de coleccionar datos consistentes, el uso apropiado de equipos, el tiempo requerido y el entendimiento de los métodos definidos, y también proveen información útil sobre la fortaleza de las aproximaciones escogidas y la robustez de las estimaciones con relación a tiempo,

personal y recursos financieros ([Weber *et al.* 2018](#)).

Los resultados preliminares de supervivencia, estado fitosanitario y crecimiento indicaron la superación de factores que determinan el establecimiento de plántulas en áreas secas tropicales, entre los que se conocen el estrés hídrico, la escasez de nutrientes, la sombra, la competencia con los pastos, la alelopatía y la invasión de plantas ([Bhadouria *et al.* 2017](#)); así como el éxito de labores de mantenimiento como la fertilización, el riego en temporada seca, el control de gramíneas y el control de herbívoros y patógenos ([Torres-Rodríguez *et al.* 2019](#)), luego de más de un año de implementación. La tasa de supervivencia reportada en este estudio fue superior a lo encontrado por [Encino-Ruiz *et al.* \(2013\)](#) quienes después de un año de monitoreo en un bosque tropical caducifolio registran una supervivencia inferior al 60 % para tres especies sembradas bajo el dosel de *Eysehhardtia polystachya* (Ortega) Sarg. A pesar de la influencia de doseles en las ER implementadas en (bs-T), el riego es imprescindible en el mantenimiento, es así como [Badano *et al.* \(2009\)](#) encontraron que la supervivencia de plántulas bajo un árbol nodriza de un ecosistema seco tropical, monitoreado por 70 días, aumentó hasta en un 58 % con el riego, y demostraron que en la estación seca el efecto combinado de nodrizas y riego es necesario para obtener valores mayores de supervivencia. Las diferencias encontradas en el crecimiento se deben a las diferencias microclimáticas en los sitios ([Bhadouria *et al.* 2017](#)), la heterogeneidad espacial natural en la disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo ([Brienen *et al.* 2010](#)), y a los rasgos de historia de vida de las especies entre los que se encuentran las estrategias particulares de crecimiento. Las diferencias en supervivencia y crecimiento observadas entre temporadas climáticas coinciden con lo reportado por [Gerhardt \(1996\)](#) quien comparó la supervivencia y crecimiento de

C. odorata y *H. courbaril*, ambas incluidas en este estudio, en un bs-T secundario en Costa Rica encontrando baja mortalidad en el periodo de lluvias y crecimiento de las plantas exclusivamente en este mismo periodo.

El desempeño observado bajo el dosel de nodrizas agrupadas se debe a que varios árboles proveen mayor sombra de manera natural que árboles isla, regulando con más impacto el microclima ([Badano *et al.* 2009](#)), además el desempeño puede ser mayor por los efectos de facilitación no solamente provistos por los árboles nodriza sino también por la agregación de varios individuos de una o varias especies en el estado de plántulas ([Bhadouria *et al.* 2017](#)). El desempeño observado para el enriquecimiento en bosque mostró la influencia de los tipos de especies seleccionadas y sus rasgos de historia de vida, cuyas características poblacionales y tasas de crecimiento son naturalmente bajas por ser típicas de estados sucesionales avanzados, cumpliéndose así lo esperado para esta estrategia. Por otra parte, en bosques el desarrollo de plántulas puede afectarse si la apertura de dosel es muy grande ([Bertacchi *et al.* 2016](#)), o muy cerrada como en bosques muy antiguos con menor disponibilidad de luz ([Basu y Behera 1993](#)), la sombra puede contribuir a reducir la mortalidad, pero las condiciones de sitio como el sustrato, el agua y la luz son determinantes para la supervivencia y el crecimiento ([Bertacchi *et al.* 2016](#)).

Numerosos estudios concluyen que el monitoreo debe extenderse más allá del tiempo de duración de los proyectos para demostrar consistentemente su efectividad e impacto ([Bash y Ryan 2002](#), [Bell *et al.* 2014](#), [Stokes *et al.* 2016](#), [Sullivan y Molles 2016](#), [Weber *et al.* 2018](#)), en este estudio la formulación del monitoreo se previó para seguir un proceso adaptativo ([Buchanan *et al.* 2014](#)) que conduzca eventualmente al

planteamiento del monitoreo a largo plazo y a procesos de investigación asociados ([Lindenmayer y Linkens 2009, 2010](#)) esenciales para la etapa de validación de las ER, que además permitan la articulación del monitoreo participativo con la integración especial de pobladores locales ([Evans y Guariguata 2016](#)).

Aunque la implementación inicial del programa de monitoreo brinde la oportunidad de realizar monitoreo a la restauración en un área piloto de bosque seco tropical (bs-T), la utilidad real del programa se verá reflejada si el monitoreo continúa y se amplía para proveer información sobre la permanencia de las especies utilizadas, y sobre el impacto de las ER en la catalización de la regeneración natural y sus efectos concomitantes en el hábitat. Esto concuerda con lo propuesto por [Florentine et al. \(2013\)](#) quienes postulan que la supervivencia y el reclutamiento sirven, por ejemplo, como indicadores complementarios para medir el éxito de la restauración en pastizales abandonados.

Para el largo plazo deberán plantearse nuevos objetivos SMART para demostrar el éxito de la restauración del bs-T a escala del paisaje, sobre todo si la implementación de ER se extiende a dicha escala. Esto implica explorar y desarrollar diseños de muestreo ([Viani et al. 2018](#)), así como recurrir a otras metodologías que se ajusten a nuevos indicadores, para hacer más eficiente el esfuerzo y los recursos financieros invertidos. La evaluación puntual, por ejemplo, es un recurso alternativo para emplear variables complementarias que no se incluyan dentro de alguna fase monitoreo debido a su tiempo de respuesta o a limitaciones financieras.

En el corto plazo se recomienda ajustar permanentemente el programa de monitoreo con base en la experiencia de su implementación a escala local, la

retroalimentación provista por el trabajo de campo y el análisis continuo de datos, siguiendo un esquema de manejo adaptativo. Se sugiere emplear los resultados de desempeño particulares de las especies para articularlos a medidas eventuales del manejo de la restauración en diferentes escalas en el área y en consideración a la variabilidad climática del bs-T. Además, se deben integrar al programa las dimensiones socio-económica y administrativa y financiera para abordar el seguimiento de otras variables críticas para el proceso de RE. Se recomienda incrementar la participación de auxiliares locales en tareas de mantenimiento y monitoreo de las ER para continuar fortaleciendo el capital social de la zona en temas de restauración del bs-T, y el apoyo de diversos actores colaboradores y financiadores para garantizar la aplicación del programa y lograr su consolidación y sostenibilidad a largo plazo.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

JEDT y AA concepción y diseño; JEDT y ST orientaciones para toma de datos; LMP y JEDT toma de datos; JEDT procesamiento de datos; JEDT, ST y AAM escritura del documento.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores recibieron apoyo financiero de la Fundación Natura para el desarrollo de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fundación Natura Colombia y Emgesa (Proyecto Plan Piloto de Restauración Ecológica de bosque seco tropical de la Central Hidroeléctrica El Quimbo), por su apoyo para la realización de este estudio. A Clara Solano y Francisco Torres, de la Subdirección de Conservación e Investigación de la Fundación Natura. A

los profesores Carolina Murcia y Álvaro Lema por su asesoría. A Wilson Gómez y a Adriana Tamayo por su constante apoyo en cartografía y SIG. A Felipe Fajardo por su colaboración y liderazgo en la fase de campo, y a los auxiliares locales por su compañía apoyo en todo el trabajo de toma de datos.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

Los anexos del 1 al 6 se presentan como material suplementario bajo el doi: <https://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.78300>.

LITERATURA CITADA

Apfelbaum SI, Haney AW, editores. 2012. *The Restoring Ecological Health to Your Land Workbook. Step 6, Develop a Good Monitoring Program*. SER. USA: Island Press. p. 91-107.

Badano EI, Pérez D, Vergara CH. 2009. Love of nurse plants is not enough for restoring oak forests in a seasonally dry tropical environment. *Restor. Ecol.* 17(5):571–576. doi: 10.1111/j.1526-100X.2009.00530.x.

Bash JS, Ryan CM. 2002. Stream restoration and enhancement projects: Is anyone monitoring? *Environ. Manage.* 29(6):877–885. doi: 10.1007/s00267-001-0066-3.

Basu S, Behera N. 1993. The effects of tropical soil conversion on soil microbial biomass. *Biol. Fert. Soils* 16(4):302–304. doi: 10.1007/BF00369310.

Bell SS, Middlebrooks ML, Hall MO. 2014. The Value of Long-Term Assessment of Restoration: Support from a Seagrass Investigation. *Restor. Ecol.* 22(3):304–310. doi: 10.1111/rec.12087.

Bertacchi MIF, Amazonas NT, Brancalion PHS, Brondani GE, de Oliveira ACS, de Pascoa MAR, Rodrigues RR. 2016. Establishment of tree seedlings in the understory of restoration plantations: Natural regeneration and enrichment plantings. *Restor. Ecol.* 24(1):100–108. doi: 10.1111/rec.12290.

Bhadouria R, Srivastava P, Singh R, Tripathi S, Singh H, Raghubanshi AS. 2017. Tree seedling establishment in dry tropics: an urgent need of interaction studies. *Environ. Syst. Decis.* 37(1):88–100. doi: 10.1007/s10669-017-9625-x.

Bjerke MB, Renger R. 2017. Being smart about writing SMART objectives. *Eval. Program Plann.* 61:125–127. doi: 10.1016/j.evalprogplan.2016.12.009.

Block WM, Franklin AB, Ward Jr. JP, Ganey LJ, White GC. 2001. Design and Implementation of Monitoring Studies to Evaluate the Success of Ecological Restoration on Wildlife. *Restor. Ecol.* 9(3):293–303. doi: 10.1046/j.1526-100X.2001.009003293.x.

Brancalion PHS, Viani RAG, Rodrigues RRR, Gandolf, S. 2012. Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração. En: Martins SV, editor. *Restauração ecológica de ecossistemas degradados*. Viçosa, Brasil: Editora UFV. p. 262–293.

Brienen RJW, Zuidema PA, Martínez-Ramos M. 2010. Attaining the canopy in dry and moist tropical forests: strong differences in tree growth trajectories reflect variation in growing conditions. *Oecologia* 163(2):485–496. doi: 10.1007/s00442-009-1540-5.

Buchanan BP, Nagle GN, Walter MT. 2014. Long-Term Monitoring And Assessment Of A Stream Restoration Project In Central New York. *River Res. Appl.* 30(2):245–258. doi: 10.1002/rra.2639.

DeLuca TH, Aplet GH, Wilmer B, Burchfield J. 2010. The Unknown Trajectory of Forest Restoration: A Call for Ecosystem Monitoring. *J. For.* 108:288–295.

[DGADRE] Directorate-General for Agriculture and Rural Development. c2015. *Technical Handbook on the Monitoring and Evaluation Framework of the Common Agricultural Policy 2014 – 2020*. European Commission. [Revisada en: 1Mar2018]. <http://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=21095&no=3>

Díaz-Martín R. 2007. El monitoreo en la restauración ecológica. En: Vargas O, GREUNAL, editores. *Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino*. Bogotá: Facultad de Ciencias, Departamento de Biología. p. 119–122.

Ehrenfeld JG. 2000. Defining the limits of restoration: The need for realistic goals. *Restor. Ecol.* 8(1):2–9. doi: 10.1046/j.1526-100X.2000.80002.x.

Elzinga CL, Salzer DW, Willoughby JW. 1998. *Measuring & monitoring plant populations*. Denver: Bureau of Land Management y TNC. U.S. Department of the Interior Bureau of Land Management.

- Encino-Ruiz L, Lindig-Cisneros R, Gómez-Romero M, Blanco-García A. 2013. Desempeño de tres especies arbóreas del bosque tropical caducifolio en un ensayo de restauración ecológica. *Bot. Sci.* 91(1):107–114.
- England J, Skinner KS, Carter MG. 2008. Monitoring, river restoration and the water framework Directive. *Water Environ. J.* 22(4):227–234. doi: 10.1111/j.1747-6593.2007.00090.x.
- Evans KA, Guariguata MR. 2016. Success from the ground up: Participatory monitoring and forest restoration. Bogor, Indonesia: CIFOR Occasional Paper 159. doi: 10.17528/cifor/006284.
- Florentine SK, Gardner J, Graz PF, Moloney S. 2013. Plant recruitment and survival as indicators of ecological restoration in abandoned pasture land in Nurcung, Victoria, Australia. *Ecol. Process.* 2:1–13. doi: 10.1186/2192-1709-2-34.
- Fundación Natura. c2010. Propuesta Piloto de Restauración, Plan de Restauración Ecológica del Bosque Seco. Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. Bogotá D.C. [Revisada en: 28 Feb 2017]. <http://www.natura.org.co/>
- Gerhardt K. 1996. Effects of root competition and canopy openness on survival and growth of tree seedlings in a tropical seasonal dry forest. *Forest Ecol. Manage.* 82(1–3):33–48. doi: 10.1016/0378-1127(95)03700-4.
- Gonzalez-M R, Avella A, Díaz-T JE. 2015. Plataformas de monitoreo para vegetación: toma y análisis de datos. En: Aguilar-G M, Ramírez W, editores. Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Bogotá: Instituto Humboldt (IAvH). p. 87–107.
- Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.* 4(1):1–9.
- Herrick JE, Schuman GE, Rango A. 2006. Monitoring ecological processes for restoration projects. *J. Nat. Conserv.* 14(3–4):161–171. doi: 10.1016/j.jnc.2006.05.001.
- Herrick JE, Van Zee JW, McCord SE, Courtright EM, Karl JW, Burkett LM. 2015. Monitoring Manual for Grassland, Shrubland, and Savanna Ecosystems Volume 1: Core Methods. Segunda edición. Las Cruces, New Mexico: USDA - ARS Jornada Experimental Range.
- Holl K, Cairns J. 2002. Monitoring and appraisal. En: Perrow MR, Davy AJ, editors. *Handbook of Ecological Restoration*. Cambridge U.K: Cambridge University Press. p. 411–432.
- Hutto RL, Belote RT. 2013. Distinguishing four types of monitoring based on the questions they address. *Forest Ecol. Manage.* 289:183–189. doi: 10.1016/j.foreco.2012.10.005.
- INGETEC. c2008. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico El Quimbo. [Revisada en: 15 Oct 2018]. http://www.proyectoelquimboemgesa.com.co/site/Portals/0/documents/Estudio_de_impacto_ambiental.pdf
- Klein LR, Clayton SR, Alldredge JR, Goodwin P. 2007. Long-term monitoring and evaluation of the lower red river meadow restoration project, Idaho, U.S.A. *Restor. Ecol.* 15(2):223–239. doi: 10.1111/j.1526-100X.2007.00206.x.
- Lindenmayer DB, Likens GE. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends Ecol. Evol.* 24(9):482–486. doi: 10.1016/j.tree.2009.03.005.
- Lindenmayer DB, Likens GE. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biol. Conserv.* 143(6):1317–1328. doi: 10.1016/j.biocon.2010.02.013.
- Londe V, Caldas de Sousa H, Kozovits AR. 2017. Key plant indicators for monitoring areas undergoing restoration: A case study at the Das Velhas River, southeast Brazil. *Ecol. Eng.* 103:191–197. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.012.
- Marignani M, Del Vico E, Maccherini S. 2007. Spatial scale and sampling size affect the concordance between remotely sensed information and plant community discrimination in restoration monitoring. *Biodivers. Conserv.* 16:3851–3861. doi: 10.1007/s10531-007-9184-4.
- Matthews JW, Spyreas G, Endress AG. 2009. Trajectories of vegetation-based indicators used to assess wetland restoration progress. *Ecol. Appl.* 19(8):2093–2107. doi: 10.1890/08-1371.1.
- Méndez-Toribio M, Martínez-G C, Cecon E, Guariguata MR. 2017. Plantas actuales de restauración ecológica en Latinoamérica: Avances y omisiones. *Trop. J. Environ Sci.* 51(2):1–30. doi: 10.15359/rca.51-2.1.
- Morán M, Campos JJ, Louman AB. 2006. Uso de Principios, Criterios e Indicadores para monitorear y evaluar las acciones y efectos de políticas en el manejo de los recursos naturales. Serie Técnica, Informe técnico/CATIE no.

347. Costa Rica: Departamento de Recursos Naturales y Ambiente Sede Central, CATIE.
- O'Connor S, Salafsky N, Salzer DW. 2004. Monitoring Forest Restoration Projects in the Context of an Adaptive Management Cycle. En: Mansourian S, Vallauri D, Dudley N, editores. *Forest Restoration in Landscapes – Beyond Planting Trees*. New York: Springer Science. p. 145–149.
- Park H, Higgs E. 2018. A criteria and indicators monitoring framework for food forestry embedded in the principles of ecological restoration. *Environ. Monit. Assess.* 190(3):113. doi: 10.1007/s10661-018-6494-9.
- Ramírez W, Aguilar-G M, Cabrera M. 2015. Introducción al monitoreo de la restauración ecológica. En: Aguilar-G M, Ramírez W, editores. *Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres*. Bogotá: Instituto Humboldt (IAvH). p. 27–32.
- Rieger J, Stanley J, Traynor R. 2014. Project Planning and Management for Ecological Restoration. *The Science and Practice of Ecological Restoration*. Washington, DC: Island Press. Chapter 13, Monitoring and Evaluation; p. 203–214.
- [SDC] Swiss Agency for Development and Cooperation. c2003. External evaluation: Are we doing the right things? Are we doing things right? [Revisada en: 15 Jun de 2016 https://www.eda.admin.ch/dam/deza/en/documents/publikationen/Diverses/23673-externe-evaluation_EN.pdf]
- Stokes DJ, Bulmer RH, Lundquist CJ. 2016. Addressing the mismatch between restoration objectives and monitoring needs to support mangrove management. *Ocean Coast. Manag.* 134:69–78. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2016.09.024.
- Sullivan JJ, Molles LE. 2016. Biodiversity monitoring by community-based restoration groups in New Zealand. *Ecol. Manag. Restor.* 17(3):210–217. doi: 10.1111/emr.12225.
- Torres JM, Magaña O. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. México D.F.: Limusa Noriega Editores.
- Torres-Rodríguez S, Díaz-Triana JE, Villota A, Gómez W, Avella-M. A. 2019. Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia* 41(1):42–59. doi: 10.15446/caldasia.v41n1.71275
- Vallauri D, Aronson J, Dudley N, Vallejo R. 2004. Monitoring and Evaluating Forest Restoration Success. En: Mansourian S, Vallauri D, Dudley N, editores. *Forest Restoration in Landscapes – Beyond Planting Trees*. New York: Springer Science. p. 150–156.
- Van Diggelen R, Grootjans AP, Harris JA. 2001. Ecological Restoration: State of the Art or State of the Science? *Restor. Ecol.* 9:115–118. doi: 10.1046/j.1526-100x.2001.009002115.x
- Vargas O, Mora F. 2007. La restauración ecológica – su contexto, definiciones y dimensiones. En: Vargas O, editor. *Estrategias para la restauración ecológica del bosque altoandino – El caso de la Reserva Forestal Municipal de Cogua, Cundinamarca*. Bogotá: Grupo de Restauración Ecológica, Universidad Nacional de Colombia y Colciencias. p. 19–40.
- Vargas O. 2011. Restauración Ecológica: Biodiversidad y Conservación. *Acta biol. Colomb.* 16(2):221–246.
- Viani RAG, Barreto TE, Farah FT, Rodrigues RR, Brancalion PHS. 2018. Monitoring Young Tropical Forest Restoration Sites: How much to measure?. *Trop. Conserv. Sci.* 11:1–9. doi: 10.1177/1940082918780916.
- Weber C, Åberg U, Buijse AD, Hughes FMR, McKie BG, Piégay H, Roni P, Vollenweider S, Haertel-Borer S. 2018. Goals and principles for programmatic river restoration monitoring and evaluation: collaborative learning across multiple projects. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 5(1):e1257. doi: 10.1002/wat2.1257.